

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ОТ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Г. М. Киясова<sup>1</sup>, В. А. Ломакина<sup>2</sup>, О. А. Абоносимов<sup>2</sup>,  
Ю. Т. Селиванов<sup>2</sup>, Н. В. Шель<sup>3</sup>, К. В. Брянкин<sup>3</sup>

*Кафедра «Транспорт и технологии» (1), ЧВПОУ «Западно-Казахстанский  
инновационно-технологический университет», Уральск, Республика Казахстан;  
кафедры: «Механика и инженерная графика» (2), mig@tstu.ru;  
«Химия и химические технологии» (3), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** кинетические характеристики; мембрана; технологические растворы; электромембранный аппарат.

**Аннотация:** Исследовано влияние трансмембранных параметров электро-мембранного процесса разделения на основные кинетические характеристики мембран МГА-95П, ОПМ-К и ОПМН-К при очистке технологических вод металлообрабатывающего производства. Дан анализ влияния трансмембранных параметров на кинетические зависимости коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран ацетатцеллюлозного и полиамидного видов. Получены аппроксимационные выражения для расчета коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости в зависимости от физико-химической основы материала полупроницаемой мембраны, величины плотности тока, концентрации и температуры технологического раствора.

---

### Введение

Проблема загрязнения водных объектов технологическими растворами металлообрабатывающих производств, содержащих ионы тяжелых металлов, вызывает необходимость поиска новых и более эффективных методов очистки от них сточных вод, например, сосредоточенных выпусков и рассредоточенного стока [1 – 4].

Одним из наиболее эффективных методов очистки является электро-мембранное разделение, при котором загрязненные стоки проходят под давлением и воздействием электрического поля через полупроницаемые мембраны. При этом получают концентрат (ретентат) и фильтрат (пермеат), используемый в замкнутом водообороте.

Для разработки схемы очистки необходимы экспериментальные данные по процессу массопереноса через мембрану. Для расчета массопереноса через мембрану необходимо получить экспериментальные данные по коэффициентам равновесного распределения и электросорбционной способности мембран, электродиффузионной проницаемости мембран.

Литературные данные по результатам исследований ведущих специалистов в области процесса массопереноса через мембрану подтверждают, что электросорбционная емкость мембран и электродиффузионная проницаемость значи-

тельно влияет на процесс электромембранного разделения. Перенос растворенного вещества через мембрану за счет электродиффузии сопоставим по величине с переносом за счет конвективного потока растворителя через мембрану [5, 6]. Электродиффузия происходит при наличии электрического поля, когда заряженные частицы в растворе подвергаются электрическим силам и мигрируют в направлении поля. В мембране это может привести к неравномерному распределению концентрации вещества, в результате изменится электрическая проницаемость мембраны и степень селективности. Конвективный перенос происходит в результате движения раствора через мембрану под действием внешних сил, а диффузный перенос происходит в результате движения молекул вещества из-за разности их концентраций в разных точках системы. Изучение всех этих составляющих переноса важно для более полного понимания процессов массопереноса через мембраны и для разработки новых материалов с высокой эффективностью и селективностью в различных приложениях, таких как фильтрация воды, очистка газов и других жидкостей, а также в процессах различных видов сепарации и катализа [6].

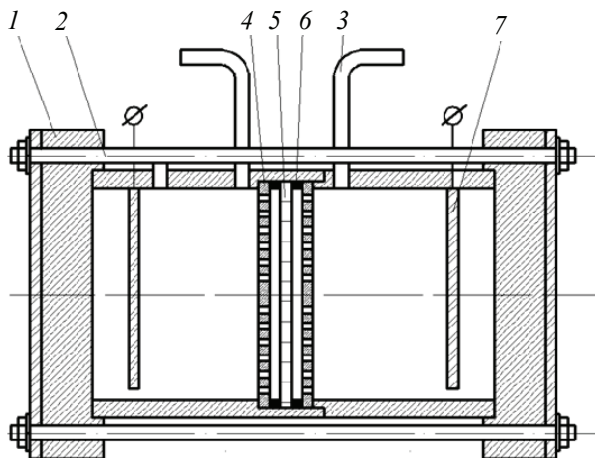
*Цель работы* – исследование кинетических коэффициентов электромембранного метода в процессе очистки технологических вод от катионов тяжелых металлов.

### Результаты экспериментальных исследований

Для исследования электросорбционной емкости мембран применяли лабораторную установку, схема которой представлена на рис. 1.

Для поддержания необходимого градиента электрического потенциала (плотности тока) использовался источник постоянного электрического тока, что позволяло поддерживать постоянное значение плотности тока на мембране в течение всего опыта. Исследуемый раствор оставляли на 11 – 13 часов, чтобы установить диффузионное равновесие, то есть после определенного времени происходит равновесие между концентрацией исследуемого вещества на разных сторонах мембраны.

Коэффициент равновесного распределения  $k_p$  определяется по следующему выражению [7, 8]:



**Рис. 1.** Лабораторная установка для исследования электросорбционной емкости:

1 – корпус; 2 – шпильки; 3 – трубки контроля уровня раствора в камерах;  
4 – перфорированные пластины; 5 – мембрана; 6 – прокладки уплотнения; 7 – электроды

$$k_p = \frac{C_M}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где  $C_M$ ,  $C_{исх}$  – концентрации растворенного вещества в полупроницаемой мембране и исследуемом растворе соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ,

На рисунке 2 приведена схема лабораторной установки, применяемая для исследования электродиффузионной проницаемости мембран.

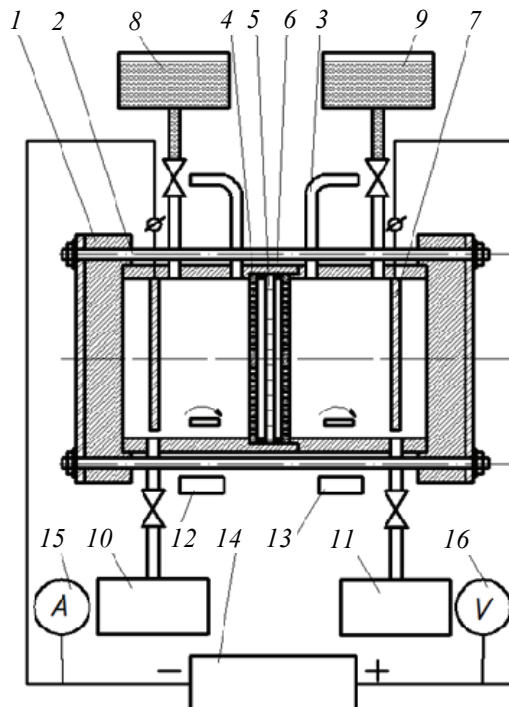
Мембраны помещались в ячейку для измерения коэффициента электродиффузионной проницаемости и в камеры заливали раствор известной концентрации, который должен проходить через мембрану. Электроды, подключенные к постоянному электрическому току, создавали движущую силу, которая приводила к прохождению растворов через мембраны. Образующиеся различия концентраций измерялись для определения коэффициента электродиффузионной проницаемости мембраны.

Коэффициент электродиффузионной проницаемости  $P_{эд}$  рассчитывали по следующей формуле [9]

$$P_{эд} = \frac{M}{F_M \tau i}, \quad (2)$$

где  $M$  – масса проницаемого вещества,  $\text{кг}$ ;  $F_M$  – рабочая площадь мембраны,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время экспериментальных исследований,  $\text{с}$ ;  $i$  – плотность тока,  $\text{А/м}^2$ .

При проведении экспериментальных исследований кинетических характеристик процесса электромембранной очистки использовались отечественные ацетатцеллюлозная мембрана МГА-95П и полиамидные ОПМ-К, ОПМН-К, промышлен-



**Рис. 2. Схема электродиффузионной установки:**

- 1 – корпус; 2 – шпильки; 3 – капилляры; 4 – перфорированные пластины; 5 – мембрана;  
6 – прокладки; 7 – электроды; 8 – 11 – емкости раствора; 12, 13 – магнитные мешалки;  
14 – источник постоянного тока; 15 – амперметр; 16 – вольтметр

Таблица 1

## Основные характеристики модельных растворов

Катионы металлов	ПДК, кг/м <sup>3</sup>	Концентрация, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С
Fe <sup>2+</sup>	0,10	0,5...2,2	5...20
Ni <sup>2+</sup>	0,02	0,3...2,0	

ленно выпускаемые ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир). При выборе мембран учитывалось наиболее оптимальное соотношение удельной производительности и задерживающей способности, обеспечивающей требования к качеству пермеата. В качестве объектов для проведения экспериментальных исследований использованы модельные растворы, имитирующие технологические растворы АО «Тамбовмаш», основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Коэффициент равновесного распределения находится в определенной зависимости от материала мембран, природы растворенных веществ и их концентрации в исходном растворе, плотности тока [6, 10]. Полученные данные в ходе экспериментальных исследований по влиянию концентрации исходного раствора и плотности тока на величину коэффициента равновесного распределения водных растворов железа и никеля представлены на рис. 3. Графики зависимостей свидетельствуют о том, что с ростом концентрации исходного раствора, уменьшается сорбционная способность полимерных мембран. Это объясняется заполнением пор сорбированными веществами, что приводит к снижению их сечения, через которое проходит вода. С уменьшением сечения молекулы, наиболее приспособленные к сорбированию, подвергаются заполнению наиболее узких пор, что приводит к полной блокировке этих пор и ограничению доступности воды. Этот аспект играет важную роль в объяснении отдельных кинетических характеристик массопереноса для мембранных разделительных процессов.

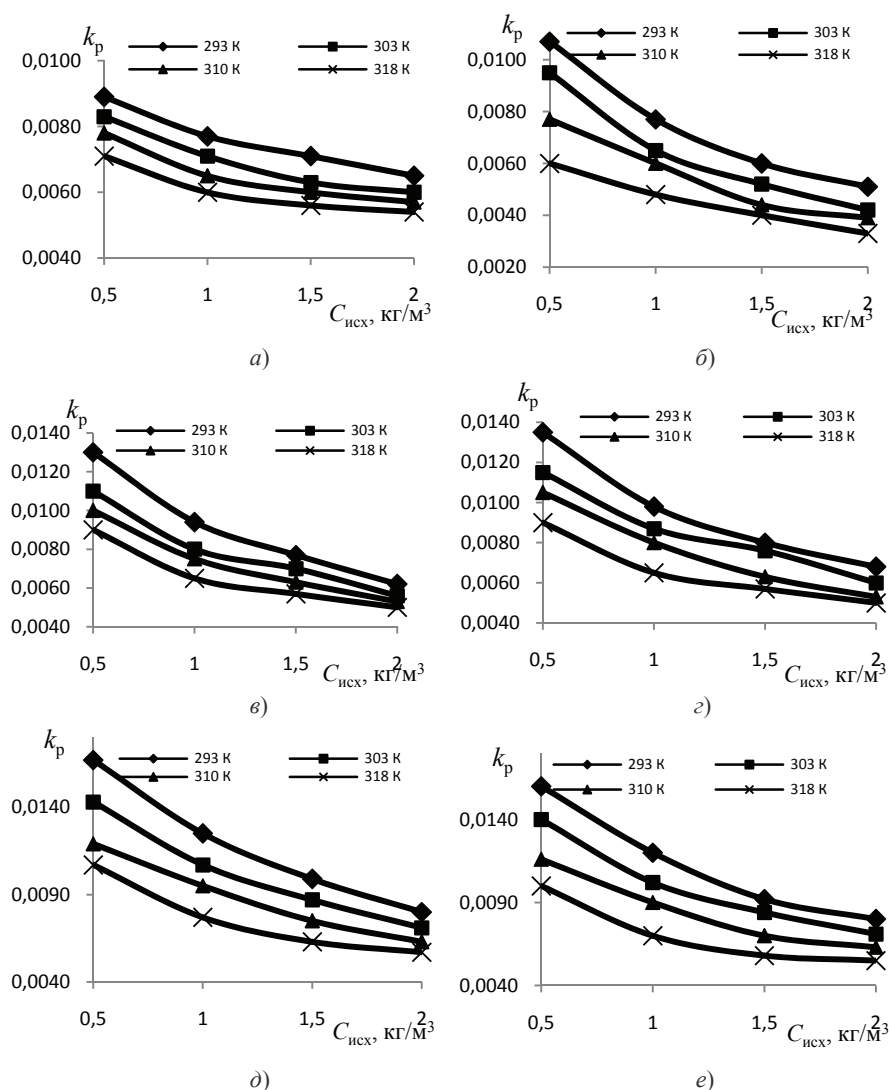
Температура заметно влияет на процесс сорбции веществ из раствора. В литературе [9, 11, 12] отмечено, что температура может как способствовать, так и препятствовать сорбции. В данном случае, наблюдалось снижение сорбционной способности полимерных мембран при увеличении температуры раствора. Это связано с тем, что при повышении температуры растворимость вещества в растворе увеличивается. В соответствии с данными из [12], атомы, образующие поверхность адсорбента, взаимодействуют как с молекулами растворенных веществ, так и с молекулами растворителя во время сорбции из растворов. При этом экспериментально установлено, что вещества с более высокой растворимостью в воде адсорбируются менее интенсивно [11, 12]. Ожидается, что эффекты взаимодействия проявятся в различных физико-химических свойствах мембран, например, в их пористости, зарядах на поверхности (например, ацетатцеллюлозные мембраны имеют отрицательный заряд, в то время как полиамидные мембраны – положительный) и т.д. [13].

Данный эффект можно объяснить различием физико-химических свойств мембран, их пористости и зарядовых характеристик поверхностей, что было замечено в ранее проведенных исследованиях [13].

Для расчета равновесных коэффициентов распределения использовано аппроксимационное уравнение вида [14]

$$k_p = b C^{n-1} \left( \frac{T_0}{T} \right)^m, \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $T_0$ ,  $T$  – реперная (293 К) и рабочая температуры соответственно;  $b$ ,  $n$ ,  $m$  – экспериментальные коэффициенты.



**Рис. 3. Зависимости коэффициента равновесного распределения мембран МГА-95П (а, б), ОПМ-К (в, г), ОПМН-К (д, е) при  $i=5,2 \text{ A/m}^2$  для раствора: а, в, д – никеля; б, г, е – железа**

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (3) приведены в табл. 2. Расхождение экспериментальных и рассчитанных по формуле (3) значений не превышает 15 %, что является достаточным для инженерных расчетов.

На рисунках 4 представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента электродиффузионной проницаемости для всех исследуемых растворов и мембран. При рассмотрении зависимости изменения коэффициентов электродиффузионной проницаемости от концентрации исследуемых веществ можно отметить их уменьшение с увеличением концентрации растворенных веществ, которое характерно для всех исследуемых веществ и типов мембран. Объяснением такой реакции коэффициента электродиффузионной проницаемости на увеличение концентрации растворенных веществ является утверждение о том, что при сорбции растворенных веществ в мембране происходит уменьшение

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (3)

Раствор	Мембрана	$b$	$m$	$n$
$\text{Ni}^{2+}$	МГА-95П	0,0198	0,445	1,32
	ОПМ-К	0,0187	0,455	3,24
	ОПМН-К	0,0253	0,444	4,32
$\text{Fe}^{2+}$	МГА-95П	0,0215	0,492	2,51
	ОПМ-К	0,0118	0,772	2,31
	ОПМН-К	0,0377	0,468	4,02

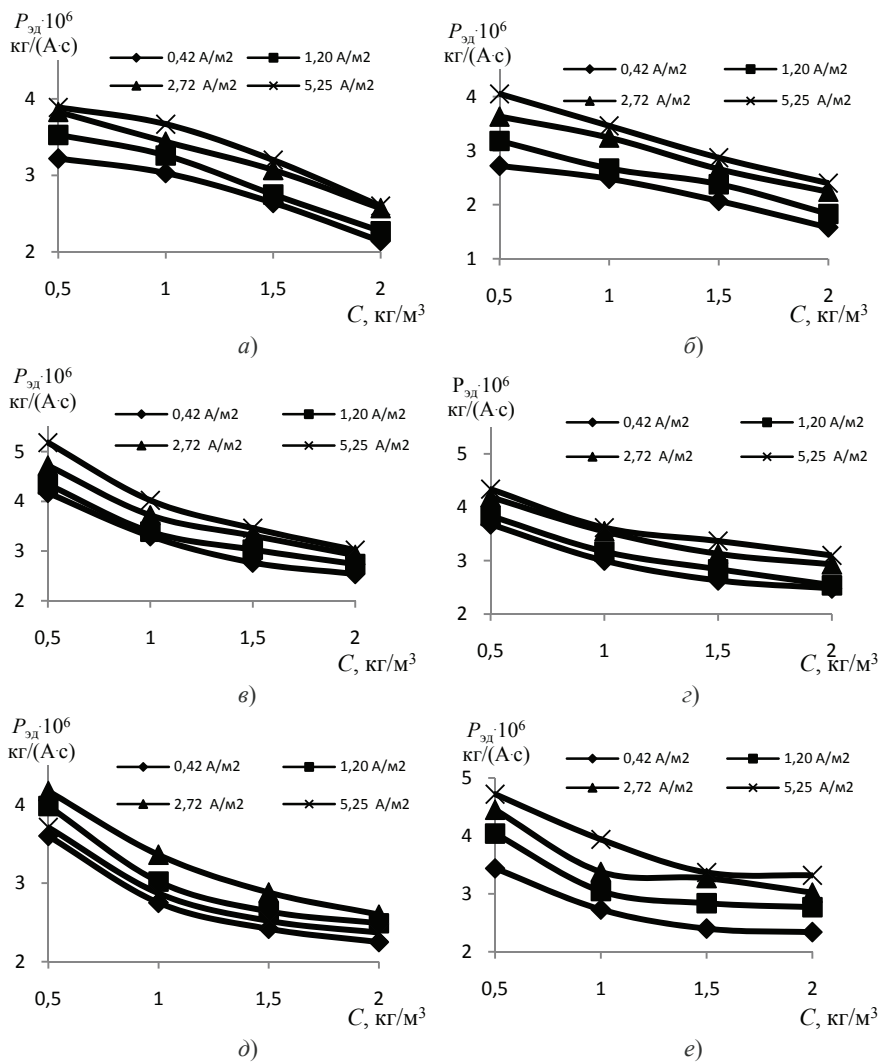


Рис. 4. Зависимости коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран МГА-95П (а, б), ОПМ-К (в, г), ОПМН-К (д, е) при  $T = 293 \text{ K}$  для раствора: а, в, д – никеля; б, г, е – железа

Таблица 3

## Значения эмпирических коэффициентов для выражения (4)

Раствор	Мембрана	$k \cdot 10^6$	$n$	$m$	$g$	$A$
$Ni^{2+}$	МГА-95П	14,622	-0,454	0,0532	0,0056	-162,1
	ОПМ-К	15,876	-0,422	0,0757	0,0042	-163,2
	ОПМН-К	7,326	0,123	0,0812	-0,0356	-161,6
$Fe^{2+}$	МГА-95П	20,624	-0,642	0,1425	0,0348	-172,4
	ОПМ-К	14,234	-0,373	0,0764	0,0042	-183,2
	ОПМН-К	5,642	0,131	0,1694	-0,0456	-47,2

свободного сечения пор и, как результат, уменьшение транспорта ионов через поровое пространство [15, 16].

Следует также отметить, что нарастание плотности тока способствует увеличению коэффициента электродиффузионной проницаемости, так как электрическое поле играет роль движущей силы, которая способствует переносу ионов через мембрану. Электродиффузионный массоперенос линейно зависит от напряжения, при условии сохранения структурных свойств мембран и свойств растворов. Поэтому, при росте плотности тока, увеличивается сила, действующая на ионы, и ускоряется процесс переноса через мембраны. Эти результаты могут быть полезны для оптимизации работы электромембранных устройств и повышения эффективности процессов разделения и очистки растворов [14 – 18].

Сравним величины коэффициентов электродиффузионной проницаемости, полученные для всех исследуемых мембран и растворенных веществ (см. рис. 4). Мембрана ОПМН-К имеет наибольшие величины коэффициента электродиффузионной проницаемости, тогда как минимальные значения наблюдаются в случае использования мембраны МГА-95П. Причинами являются различия в материалах, из которых изготовлены активные слои мембран, а также различные пористости и поверхностные потенциалы мембран.

Проведенный анализ зависимостей изменения коэффициента электродиффузионной проницаемости и литературных данных других авторов исследований позволил предложить следующее выражение для математического описания [15]:

$$P_{эд} = k(C^n)(i^m) \exp(Cg) \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (4)$$

где  $C$  – концентрация растворенных веществ,  $кг/м^3$ ;  $a$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $g$  – эмпирические коэффициенты.

Расхождения экспериментальных и расчетных значений коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран совпадают достаточно хорошо и не превышают 15 %.

### Заключение

Для очистки технологических растворов от ионов тяжелых металлов выбран метод электромембранного разделения, как наиболее экономически и экологически эффективный. Результатом проведенных экспериментальных исследований является получение оригинальных данных по коэффициентам равновесного распределения и коэффициентам электродиффузионной проницаемости мембран МГА-95П, ОПМ-К, ОПМН-К по растворам никеля и железа в зависимости от изменения основных параметров проведения процесса разделения. Проанализиро-

ваны зависимости коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости от концентрации растворенных веществ для всех исследуемых мембран, и выявлены факторы влияния. Объяснено влияние температуры раствора на изменение коэффициента равновесного распределения и плотности тока на изменение коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран.

В результате анализа полученных зависимостей и литературных данных других исследователей предложены выражения для математического описания коэффициента равновесного распределения и коэффициента электродиффузионной проницаемости мембран со значениями эмпирических коэффициентов для исследуемых растворов и мембран. Предложено использовать полученные результаты исследований в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, используемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод.

*Работа выполнена в рамках проведения исследования по государственному заданию, проект № FEMU-2024-0011.*

#### *Список литературы*

1. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России / В. Б. Сажин, А. Б. Полковников, И. Селдинас [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. 23, № 12(105). – С. 94 – 108.
2. Колесников, В. А. Очистка сточных вод на металлургических предприятиях / В. А. Колесников, В. И. Ильин, А. А. Кучеров // Экология производства. – 2010. – № 3. – С. 31 – 36.
3. Павлов, Д. В. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / Д. В. Павлов, С. О. Вараксин, В. А. Колесников // Чистая вода: проблемы и решения. – 2010. – № 2–3. – С. 50 – 59.
4. Пути решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов / Е. А. Комягин, В. Н. Мынин, И. Ф. Ляпин [и др.] // Экология и промышленность России. – 2008. – № 11. – С. 21 – 23.
5. Paidar, M. Membrane electrolysis – History, current status and perspective / M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 209. – P. 737 – 756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209
6. Свитцов, А. А. Введение в мембранные технологии. – М. : ДеЛи принт, 2007. – 170 с.
7. Toth, J. Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis (Surfactant Science Series, Vol. 107). – Marcel Dekker, 2006. – 878 p.
8. Rouquerol, F. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications / F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. Sing. – San Diego, Calif.: Academic Press, 2005. – 467 p.
9. Some Kinetic Dependence of Electrohyperfiltration Method of Purification of Wastewater from Iron Ions / A. A. Levin, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev, O. A. Kovaleva // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 295 – 306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306
10. Мембраны и мембранные технологии : монография / А. Б. Ярославцев [и др.] ; отв. ред. А. Б. Ярославцев. – М. : Научный мир, 2013. – 616 с.
11. Karge H. G., Weitkamp J. Adsorption and Diffusion (Molecular Sieves). – 2008. – 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1
12. Ягодовский, В. Д. Адсорбция [Электронный ресурс] / В. Д. Ягодовский. – Эл. изд. – Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 219 с.). М. : БИНОМ ; Лаборатория знаний, 2015. – 219 с. (Учебник для высшей школы). – Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10



13. Ямпольский, Ю. П. Методы изучения свободного объема в полимерах / Ю. П. Ямпольский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 1. – С. 66 – 87.
14. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на очистных предприятиях / О. А. Абоносимов, М. А. Кузнецова, О. А. Ковалева, В. М. Поликарпов, В. М. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641 – 655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655
15. Чепеняк, П. А. Электродиффузионная проницаемость ультрафильтрационных мембран в водных фосфатсодержащих растворах / П. А. Чепеняк, В. Л. Головашин, С. И. Лазарев // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 52 – 56.
16. Филиппов, А. Н. Ячеечная модель ионообменной мембраны. Электродиффузионный коэффициент и диффузионная проницаемость / А. Н. Филиппов // Коллоидный журнал. – 2021. – Т. 83, № 3. – С. 360 – 372. doi: 10.31857/S002329122103006X
17. Акулиничев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов / А. М. Акулиничев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.120-128
18. Мембранная очистка технологических растворов от ионов железа и марганца / А. А. Левин [и др.] // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 11. – С. 70 – 73.

---

## Efficiency of Electromembrane Purification of Process Solutions from Heavy Metal Cations

G. M. Kiyasova<sup>1</sup>, V. A. Lomakina<sup>2</sup>, O. A. Abonosimov<sup>2</sup>, Yu. T. Selivanov<sup>2</sup>,  
N. V. Shel<sup>3</sup>, K. V. Bryankin<sup>3</sup>

*Department of Transport and Technology (1), West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, Republic of Kazakhstan;*

*Department of Mechanics and Engineering Graphics (2), mig@tstu.ru;*

*Department of Chemistry and Chemical Technology (3), TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** kinetic characteristics; membrane; technological solutions; electric membrane apparatus.

**Abstract:** In this paper, the kinetic coefficients of the electromembrane method were studied in the process of purifying process waters from heavy metal cations. The objects of research are technological solutions containing iron and nickel cations and semi-permeable cellulose and polymer acetate membranes with various selectively permeable characteristics. The influence of transmembrane parameters of the electromembrane separation process on the main kinetic characteristics of MGA-95P, OPM-K and OPMN-K membranes during the purification of process waters in metalworking production was studied. An analysis of the influence of transmembrane parameters on the kinetic dependences of the equilibrium distribution coefficient and the coefficient of electrodiffusion permeability of cellulose acetate and polyamide membranes is given. Approximation expressions are obtained for the theoretical calculation of the equilibrium distribution coefficient and the electrodiffusion permeability coefficient depending on the physicochemical basis of the semipermeable membrane material, the current density, the concentration and temperature of the process solution. Numerical values of empirical coefficients have been determined that

make it possible to calculate and predict the values of the equilibrium distribution coefficient and the electrodiffusion permeability coefficient, which can be used in the design of laboratory, pilot and industrial installations used in production processes for the separation, purification and concentration of technological and waste waters.

### References

1. Sazhin V.B., Polkovnikov A.B., Seldinas I. [et al.], [Problems of ecology and rational use of natural resources in the context of economic development of Russia], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2009, vol. 23, no. 12(105), pp. 94-108 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Kucherov A.A. [Wastewater treatment at metallurgical enterprises], *Ekologiya proizvodstva* [Ecology of production], 2010, no. 3, pp. 31-36 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Pavlov D.V., Varaksin S.O., Kolesnikov V.A. [Wastewater treatment of various industries using the best available technologies], *Chistaya voda: problemy i resheniya* [Clean water: problems and solutions], 2010, no. 2-3, pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Komyagin Ye.A., Mynin V.N., Lyapin I.F. [et al.], [Solutions to the Problem of Wastewater Purification from Heavy and Radioactive Metals], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 11, pp. 21-23 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane electrolysis – History, current status and perspective, *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 209, pp. 737-756. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.209
6. Svittsov A.A. *Vvedeniye v membrannyye tekhnologii* [Introduction to Membrane Technologies], Moscow: DeLi print, 2007, 170 p. (In Russ.)
7. Toth J. *Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis* (Surfactant Science Series, vol. 107), Marcel Dekker, 2006, 878 p.
8. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K. *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*, San Diego, Calif.: Academic Press, 2005, 467 p.
9. Levin A.A., Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kovaleva O.A. Some Kinetic Dependence of Electrohyperfiltration Method of Purification of Wastewater from Iron Ions, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 295-306. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.295-306
10. Yaroslavtsev A.B. [et al.] *Membrany i membrannyye tekhnologii: monografiya* [Membranes and membrane technologies: monograph], Moscow: Nauchnyy mir, 2013, 616 p. (In Russ.)
11. Karge H.G., Weitkamp J. *Adsorption and Diffusion* (Molecular Sieves), 2008, 467 p. doi: 10.1007/978-3-540-73966-1
12. Yagodovskiy V.D. *Adsorbtsiya* [Adsorption], Moscow: BINOM; Laboratoriya znaniy, 2015, 219 p. (In Russ.)
13. Yampol'skiy Yu.P. [Methods for studying free volume in polymers], *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry], 2007, vol. 76, no. 1, pp. 66-87. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Abonosimov O.A., Kuznetsova M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependencies and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater at treatment plants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Chepenyak P.A., Golovashin V.L., Lazarev S.I. [Electrodiffusion permeability of ultrafiltration membranes in aqueous phosphate-containing solutions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology], 2012, vol. 55, no. 8, pp. 52-56. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Filippov A.N. [Cell model of ion-exchange membrane. Electrodiffusion coefficient and diffusion permeability], *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 2021, vol. 83, no. 3, pp. 360-372. doi: 10.31857/S002329122103006X (In Russ., abstract in Eng.)

17. Akulinichev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Study of electrobaromembrane separation of industrial process solutions containing heavy metal ions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.120-128 (In Russ., abstract in Eng.)

18. Levin A.A. [et al.], [Membrane purification of process solutions from iron and manganese ions], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, vol. 22, no. 11, pp. 70-73 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Untersuchung der kinetischen Koeffizienten des Prozesses der Elektromembranreinigung von technologischen Lösungen aus Schwermetall-Kationen**

**Zusammenfassung:** Es ist der Einfluss von Transmembranparametern des Elektromembran-Trennprozesses auf die wichtigsten kinetischen Eigenschaften von MGA-95P-, OPM-K- und OPMN-K-Membranen während der Reinigung von Prozesswässern in der metallverarbeitenden Produktion untersucht. Es ist die Analyse des Einflusses von Transmembranparametern auf die kinetischen Abhängigkeiten des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten und des Elektrodifusionspermeabilitätskoeffizienten von Acetat-Cellulose- und Polyamid-Membranen vorgestellt. Es sind Näherungsausdrücke zur Berechnung des Gleichgewichtsverteilungskoeffizienten und des Elektrodifusionspermeabilitätskoeffizienten in Abhängigkeit von der physikalisch-chemischen Basis des semipermeablen Membranmaterials, der Stromdichte, der Konzentration und der Temperatur der Prozesslösung erhalten.

---

### **Étude des coefficients cinétiques du procédé de nettoyage électromembranaire des solutions de cations de métaux lourds**

**Résumé:** Est étudiée l'influence des paramètres transmembranaires du processus de la séparation électromembranaire sur les principales caractéristiques cinétiques des membranes MGA-95P, OPM-K et OPMN-K dans le nettoyage des eaux de traitement de la production de métaux. Est analysée l'influence des paramètres transmembranaires sur les dépendances cinétiques du coefficient de répartition à l'équilibre et du coefficient de perméabilité à l'électrodifusion des membranes des espèces d'acé-tatcellulose et de polyamide. Sont obtenues des expressions d'approximation pour calculer le coefficient de la distribution d'équilibre et le coefficient de perméabilité à l'électrodifusion en fonction de la base physico-chimique du matériau de la membrane semi-perméable, de la densité de courant, de la concentration et de la température de la solution.

---

**Авторы:** *Киясова Гульзада Мадиевна* – старший преподаватель кафедры «Транспорт и технологии», ЧВПОУ «Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет», Уральск, Республика Казахстан; *Ломакина Виктория Александровна* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Шель Наталья Владимировна* – доктор химических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.